

木材を教材とした建築工学教育の提案

著者	高岩 裕也
著者別名	TAKAIWA Yuya
雑誌名	工業技術
巻	43
ページ	45-49
発行年	2021-02-24
URL	http://doi.org/10.34428/00012422

木材を教材とした建築工学教育の提案

Proposal of architectural engineering education using timber as a teaching material

高岩 裕也*

1. はじめに

我が国には、木造建築物が数多く現存しており、その中でも歴史的価値を有する文化財建造物として保存・活用されている歴史的木造建築物がある。歴史的木造建築物を保存・活用するにあたって、安全性の担保といった観点から現状の耐震性能を評価し、必要に応じて耐震補強を行う必要がある。そこで、耐震性能を評価するために、耐震診断が行われるが、歴史的木造建築物においては破壊検査や微破壊検査ではなく、古材を傷つけない非破壊検査方法が望まれている。耐震性能を評価する際のファクターの一つである木部材のヤング係数について、木部材を取り出して、理想的な力学モデル化可能な支持条件で設置し、ヤング係数を非破壊評価する方法は既に確立例えば¹⁾²⁾されているものの、既存木造建築物に取付く木部材においては、横架材の取り付けによる固定度合や、重量などの未知数が多く存在するため、評価手法が確立されていないのが現状である。そこで、筆者は、既存木造建築物の木部材の振動を計測して非破壊でヤング係数を評価する手法の構築を行っている。

ところで、筆者が担当している弾性論・材料力学の講義・演習に「建築の形態とちからⅡ」、「建築の形態とちから演習」というものがある。その講義では、フックの法則から始まり、最終的に梁のたわみ式を教えることになっている。たわみ式を展開すれば、ヤング係数を求めることができるため、梁中央部に実際に学生が乗り、その時の中央たわみ量を計測することで、集中荷重が作用した場合の単純梁のたわみ式を用いて、自らの体重とたわみ量からヤング係数を評価することができる。そのように講義内容の理解を深めるための簡易実験を実施しようと考えている。その際に、

冒頭で述べた研究で用いている非破壊によるヤング係数を評価する方法を紹介し、実際に測定評価・比較を行うことで、研究・ゼミ活動の導入として教育に研究機材が活用できるのではないかと考えた。また、実験に用いる木材の準備測定などを通じて、研究に対する姿勢や考え方についても学ぶきっかけとなることが期待できる。さらに木材の詳細の測定について行うことで、筆者が担当している「木造建築学」という講義の資料としても活用することができる。本報では、実施する予定の簡易実験の一連の流れを紹介するとともに、その中で得られた測定結果について報告する。

2. 試験体概要

2. 1 使用する木材

秋田県産のすぎ（秋田すぎ）直径約 700mm の 2 番玉から長さを 2900mm、幅、高さを 150mm の角材を目標として 164mm 角に荒挽き製材したものを試験体として用いる。荒挽き製材とは、乾燥収縮、変形を考慮して大きめの断面に製材することを意味する。ここで、比較のために、心材と辺材の 2 種類を使用する。写真 1 に試験に使用した木材を示す。辺材は二方桎となっている。写真 1 に製材前の丸太の状態を、写真 2 に製材後の角材の状態をそれぞれ示す。



写真 1 丸太の木口



写真 2 製材後の木口

3. 準備測定方法

3. 1 含水率測定

写真 3 に示す高周波誘電率方式の木材水分計（マイクロメジャー社 HS-200）を用いて、測定深度が約 40mm の含水率を測定する。測定位置は、両外側 1/5 の位置と 3/5 の位置で、表・裏・側面をそれぞれ測定する。絶乾比重は、各メーカーによって異なるが、マイクロメジャー社推奨値であるすぎ：0.35 を用いた。



写真 3 含水率計測の様子

3. 2 密度測定

試験体の各辺寸法を幅、高さについてデジタルノギス、長さをコンベックスで測定して容積 v を求め、質量 w を秤量して密度 ρ (kg/m^3) = w/v を小数点以下 2 位まで求める。試験体の各辺寸法については含水率測定位置と同位置を計測する。

3. 3 平均年輪幅測定

木口面上で年輪に垂直な方向の年輪幅 (a mm) / 年輪数 (n) を、mm 単位で小数点以下 2 位まで測定する。また、最大年輪幅と最小年輪幅も測定する。測定のために木口面をサンダーで削り、紙やすり 240 番で仕上げて整えた。木口面の様子を写真 4 に示す。



写真 4 木口面（左：心材／右：辺材）

4. ヤング係数測定

4. 1 縦振動法によるヤング係数測定³⁾

縦振動法は、図 1 のように木材の木口面をハンマによって打撃し、発生した音を計測し、計測によって得られた波形をフーリエ変換することで、固有振動数を得る方法である。一般的に、打撃音法、タッピング法といわれ、固有振動数と質量の関係から、ヤング係数を求める方法である。

振動によって引張の慣性力が木材中を伝わる現象に対して、ヤング係数を E 、密度を ρ 、材軸を x 、時刻を t 、縦方向変位を u として、ダランベールの原理を用いて振動方程式を立てると以下ようになる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

これを、固有振動数 $f(\text{Hz})$ の式にすると、

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで、 ρ は密度 (kg/m^3) で $\rho = w/(L \cdot A)$ 、 w は重量 (kg)、 L は材長 (m)、 A は断面積 (m^2)、 $n = 1, 2, 3 \dots$ である。このとき材のヤング係数 E (N/m^2) は、

$$E = (2L \cdot f)^2 \rho = \frac{4L \cdot f^2 w}{A}$$

で与えられる。このように振動数から求められたヤング係数は、動的ヤング率と呼ばれ、静的な载荷によって求めた静的ヤング係数と高い相関関係¹⁾にあることが木材においても確認されている。

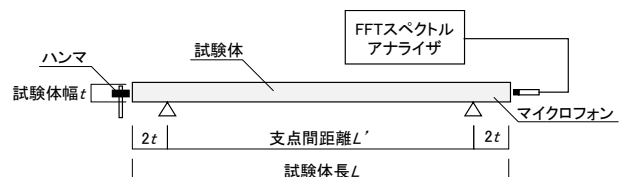


図 1 縦振動法によるヤング係数測定システム

本測定では、既存木造建築物への非破壊調査としての適応を目的とする研究背景を鑑みて、一般的に用いられている鋼製ハンマではなく、打撃位置に比較的傷が付きにくいショックレスハンマを用いた。

4. 2 横振動法によるヤング係数測定³⁾

使用機器は、縦振動法と同様で、試験体を両端で単純支持し、材中央部をハンマで打撃して打音を測定する方法が横振動法である。図2に試験概要を示す。この場合、横振動によるはり分布荷重 p が慣性力となり、ダランベールの原理を用いて横方向変位 y に関する振動方程式が下記のように立てられる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -p = -\rho A \frac{\delta^2 y}{\delta t^2}$$

ここで、 I は断面2次モーメント(m^4)である。固有振動数 $f(\text{Hz})$ が次式で与えられる。

$$f = \frac{i \cdot m^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで、 $i^2 = \frac{1}{A} = \frac{D^2}{12}$ 、 π は円周率、 m は振動次数によって決まる定数(両端自由もしくは両端固定の場合 $m_i = 4.730$)、 D は断面せい(m)である。このとき材のヤング係数 $E(\text{N/m}^2)$ は、下記ようになる。

$$E = \frac{(2\pi)^2 \cdot L^4 \cdot f^2 \cdot \rho}{i^2 \cdot m^4} = \frac{48\pi^2 \cdot L^4 \cdot f^2 \cdot \rho}{D^2 \cdot 4.730^4}$$

ここで、支点間距離 L は 2238 mm とした。

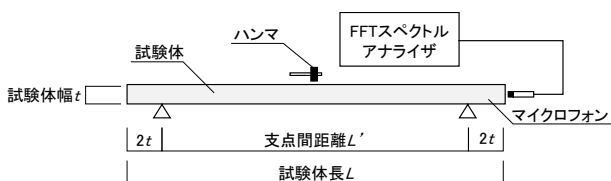


図2 横振動法によるヤング係数測定システム

4. 3 伝達関数の計測によるヤング係数の評価

材軸方向にインパルスハンマにて打撃し、反対方向に据え付けられた振動を圧電式加速度ピックアップにて、加速度測定を行い、その両波形から伝達関数を演算し、固有振動数を求める。計算式は4.1の方法と同様である。

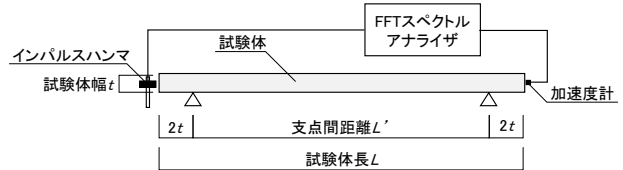


図3 伝達関数計測によるヤング係数評価システム

5. 測定結果

5. 1 準備測定結果

準備測定結果を表に示す。試験体寸法は心材、辺材ともに同等の寸法となっている。写真4に示した木口の状態より、心材には割れが断面の周辺に多く発生しており、天然乾燥の特徴をよく表していることが確認できる。含水率についても節部分を除き、15%以下に乾燥されていることを確認し、平均値ではやや心材の方が含水率が低い結果となっている。年輪幅は、心材の方が大きい。最大年輪幅、最小年輪幅の測定結果から、辺材の年輪幅はばらつきが小さく、均一なものとなっていることが確認できる。

表1 準備測定結果一覧

測定項目	心材	辺材
高さ	163mm	163mm
幅	161mm	164mm
長さ	2910mm	2890mm
含水率	11.3%	13.1%
年輪幅	5.37mm	1.84mm
最大年輪幅	7.97mm	1.86mm
最小年輪幅	3.38mm	1.81mm

※ここで、最大年輪幅、最小年輪幅を除く測定項目については、平均値を記載した。

5. 2 ヤング係数測定結果

縦振動法による測定結果を図 4 に、横振動法による測定結果を図 5 に、伝達関数による方法を図 6 にそれぞれ示す。各 10 回平均のデータから導かれるものである。

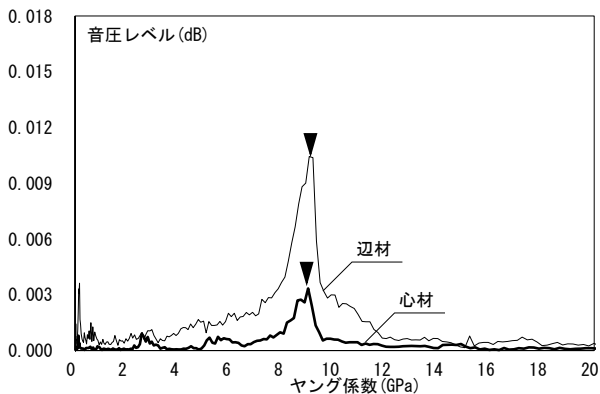


図 4 縦振動法 スペクトル図

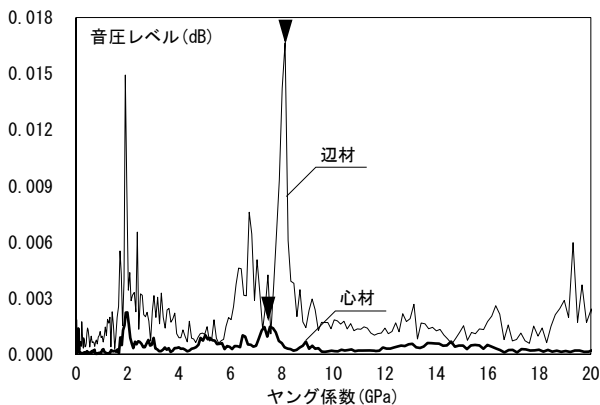


図 5 横振動法 スペクトル図

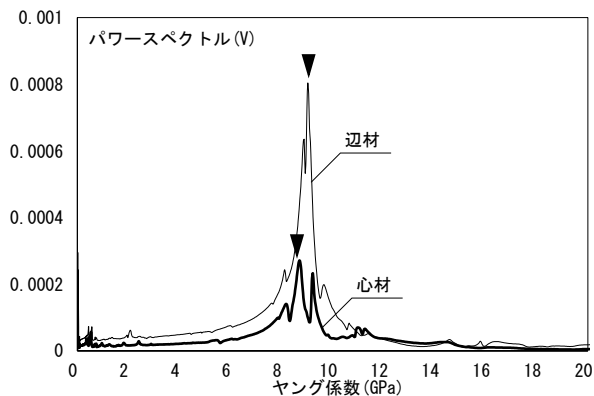


図 6 伝達関数

6. たわみ式と測定結果の比較

6. 1 たわみ式

梁中央部に集中荷重 P を作用させて、その時の中央たわみ量 y を計測することで、集中荷重 P が作用した場合の単純梁のたわみ式を用いて、集中荷重 P とたわみ量 y の関係からヤング係数 E を評価する。たわみ式より、集中荷重時の中央たわみ量 y_{max} は下記のように求められる。

$$y_{max} = \frac{PL^3}{96EI} \left\{ 3 \left(\frac{2x}{L} \right) - \left(\frac{2x}{L} \right)^3 \right\} = \frac{PL^3}{48EI}$$

この時、ヤング係数 E は以下の通りである。

$$E = \frac{PL^3}{48y_{max}I}$$

講義では、以下の演習問題を出題する予定である。

「建築の形態とちからⅡで学んだ知識を用いてすぎ木材のヤング係数を求め、木材等級を示しなさい。また、講義で紹介した非破壊測定の結果と比較して、実験で得られた値の妥当性について説明しなさい。

・・・ヒントとして、まず、支点間距離 L および断面 2 次モーメント I は、スパン、木材の幅、高さの寸法を計測することで求めることができる。すると残る未知数は、たわみ量 y_{max} と集中荷重 P の項だけとなるので、梁中央部に乗り、その時のたわみ量を計測すれば、自身の体重を用いてヤング係数 E を求めることができる。」

ここで、機械による等級区分法とは、曲げ試験機等によって非破壊的に測定される曲げヤング係数に基づいて強度の等級区分を行う方法である。ヤング係数と強度には統計的に高い相関があることが確認されているため、目視等級区分法に比べて高い精度で木材を強さ別に仕分けることが出来る方法であり、機械等級区分構造用製材は表 2 のように等級区分される。

表 2 機械等級区分構造用製材の等級区分

木材 等級	重力単位系	SI 単位系
	t/cm ²	N/mm ²
E50	40 ≤ E < 60	3.923 ≤ E < 5.884
E70	60 ≤ E < 80	5.884 ≤ E < 7.845
E90	80 ≤ E < 100	7.845 ≤ E < 9.807
E110	100 ≤ E < 120	9.807 ≤ E < 11.768

6. 2 比較結果

非破壊測定と比較結果を表 3 に示す。得られた値から木材等級を決定すると、心材の横振動法を除き E90 の等級に分類された。横振動法は、心材、辺材ともに縦振動法、伝達関数による方法に比べてヤング係数が低く評価される結果となった。また、横振動法には卓越固有振動数が散見され、縦振動法と比較してピークの検出が難しい傾向にあることを確認した。

表 3 ヤング係数測定結果一覧

測定方法		心材	辺材
4.1	縦振動法	8.98GPa	9.02GPa
4.2	横振動法	7.54GPa	8.13GPa
4.3	伝達関数	8.74GPa	9.02GPa

7. まとめ

本報は、製材された秋田すぎの心材および辺材を用いて、縦振動法、横振動法、伝達関数の評価によるヤング係数の非破壊評価によるヤング係数の評価を実施した。それらについて、筆者が担当している「建築の形態とちからⅡ」、「建築の形態とちから演習」という講義・演習で、講義内容の理解を深めるための簡易実験として提案し、その演習問題について示した。

秋田すぎの丸太とラミナの縦振動法と小載荷によってヤング係数を評価した既往研究^{1) 2)}があり、縦振動法で求めた平均ヤング係数が 8.03GPa、小載荷によって評価したヤング係数が 8.01GPa とほぼ等価¹⁾であることが確認されており、本研究で得られた結果が同様の傾向を示すことを確認した。また、得られた値から

木材等級を決定すると、心材の横振動法を除き E90 の等級に分類された。横振動法は、心材、辺材ともに縦振動法、伝達関数による方法に比べてヤング係数が低く評価される結果となった。また、横振動法には卓越固有振動数が散見され、縦振動法と比較してピークの検出が難しい傾向にあることを確認した。これは、横振動法が振動モードに影響を受けるためであると推察する。

本報で提案した簡易実験を講義・演習で実施した際には、アンケートを実施し、受講生の講義内容の理解度に対して、簡易実験が役立ったかを確認する予定である。

また、今後の研究としては、既存木造建築物の木部材の木口を打撃することは困難であることから、横振動法を応用して、非破壊測定方法を確立していく予定である。

8. 謝辞

本報で用いた非破壊測定機については、2020 年度井上円了研究助成金で購入したインパルスハンマ、および 2020 年度学部長施策研究で購入した音響センサを教育のために活用した。また、実験を行うにあたって、東洋大学理工学部建築学科高岩研究室 4 年生の細川さんおよび荒幡さんにご尽力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 飯島泰男、岡崎泰男：秋田県産スギ材の材質と強度性能 (II)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1、pp.77-78、1995 年 7 月
- 2) 飯島泰男、岡崎泰男、小泉章夫：秋田県産杉材の材質と強度性能 (III)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1、pp.5-6、1996 年 7 月
- 3) 岩井哲、大林眞：木材弾性係数の非破壊計測のための工学実験教育における打撃音法の利用、広島工業大学紀要 教育編 6、pp.15-18、2007 年 2 月